

УДК 621.17

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.04

ПРЕИМУЩЕСТВА ИМПУЛЬСНОГО ПОДВОДА ТЕПЛА ДЛЯ ПОКРЫТИЯ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Ф. И. ЛУХТУРА*, В. И. ЦЫГАНОВ

кафедра ПТЭУ и ТС, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь, УКРАИНА

*e-mail: lukhlena@yandex.ru

АННОТАЦИЯ Рассмотрены практические приложения полученных ранее теоретических результатов по применению импульсного (циклического) подвода теплоты от источника тепла (котла), работающего на тепловую сеть, для покрытия существенно переменных нагрузок системы теплоснабжения. Проведен анализ эффективности работы системы теплоснабжения с различными блоками котельных установок и параметрами систем теплоснабжения при переменных нагрузках на основе анализа разработанной математической динамической модели системы производства и распределения теплоты. Полученная инженерная теория послужила также основой для разработки алгоритмов оптимизации системы при ступенчатом регулировании подвода теплоты источниками тепла путем их перевода на холостой ход, в т. ч. глубоким снижением нагрузки, или с полным их отключением, на переменных режимах работы котельной при покрытии неравномерных графиков ее нагрузок. При этом оценены затраты потребляемой тепловой энергии с целью повышения экономической эффективности и выбора определенного состава оборудования котельной в предлагаемых режимах. Определены, в зависимости от емкости тепловой сети и/или аккумулирующих теплоту устройств, величины потребления теплоты и режимов регулирования, рациональные компоновки котельного оборудования с минимизацией потребления энергоресурсов. Оценены эффективные значения длительности импульсов подачи теплоты агрегатами котельной и паузы между импульсами, а также скважности импульсов, при использовании различных блоков котельного оборудования. При этом важной характеристикой надежности системы теплоснабжения является частота циклов, лимитирующая число регламентированных включений котлов соответствующей мощности в связи с наличием усталостных напряжений в них. Показано существенное влияние перечисленных факторов и указанных функциональных параметров на характеристики импульсного подключения источников тепла и интенсивность подачи энергоносителя при переменных нагрузках. Характерно, что при сравнении различных режимов импульсной подачи (с холостым ходом и без) более предпочтительным режимом является режим с полным отключением источников теплоты от тепловой сети. При этом эффективность растет с ростом числа эксплуатируемых агрегатов и достигает 10% по сравнению с традиционным способом подвода теплоты для покрытия переменных нагрузок тепловых сетей. Полученные результаты также могут быть полезны для решения оптимизационных задач при работе индивидуальной котельной на переменных режимах при покрытии ее различных, в т. ч. суточных, графиков нагрузок. Данный подход и представленные решения могут быть распространены на любые другие источники теплоты, использующие в качестве рабочей среды, как жидкость, так и газ (пар), для покрытия неравномерных соответствующих тепловых нагрузок.

Ключевые слова: графики нагрузок; источник тепла (котел); рабочая среда; энергия; аккумулятор; импульсное (циклическое, ступенчатое) регулирование; эффективность

ADVANTAGE OF PULSE HEAT SUPPLY FOR COVERING VARIABLE LOADS IN HEAT SUPPLY SYSTEMS

F. LUKHTURA, V. TSIGANOV

Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, SHEE "PSTU", Mariupol, UKRAINE

ABSTRACT Practical applications of previously obtained theoretical results on the use of pulsed (cyclic) heat supply from a heat source (boiler) operating on a heating network to cover substantially variable loads of a heat supply system are considered. The analysis of the efficiency of a heat supply system with various blocks of boiler plants and the parameters of heat supply systems at variable loads is carried out based on the analysis of the developed mathematical dynamic model of the heat production and distribution system. The obtained engineering theory also served as the basis for the development of system optimization algorithms for the stepwise regulation of heat supply by heat sources by switching them to idle speed, including a deep reduction in the load, or with their complete shutdown, at variable modes of the boiler room while covering uneven schedules of its loads. At the same time, the costs of consumed thermal energy were estimated in order to increase economic efficiency and select a certain composition of the boiler equipment in the proposed modes. Depending on the capacity of the heating network and / or heat storage devices, the values of heat consumption and regulation modes, rational layout of boiler equipment with minimization of energy consumption are determined. The effective values of the duration of the heat supply pulses by the boiler units and the pause between pulses, as well as the duty cycle of the pulses using various blocks of boiler equipment, are estimated. An important characteristic of the reliability of the heat supply system is the frequency of cycles that limit the number of regulated starts of boilers of the corresponding capacity due to the presence of fatigue stresses in them. The significant influence of the listed factors and the specified functional parameters on the characteristics of the pulsed connection of heat sources and the intensity of the energy supply at variable loads is shown. It is characteristic that when comparing different modes of pulsed supply (with and without idle), the more preferable mode is the mode with the heat sources completely disconnected from the heating network. At the same time, efficiency increases with the number of

operating units and reaches 10% compared to the traditional method of supplying heat to cover the variable loads of heating networks. The results obtained can also be useful for solving optimization problems when operating an individual boiler house in variable modes when covering it with various ones, including annual, load schedules. This approach and the presented solutions can be extended to any other sources of heat, using both liquid and gas (steam) as a working medium, to cover the uneven corresponding thermal loads.

Keywords: load schedules; heat source (boiler); working medium; energy; battery; pulse (cyclic, step) regulation; efficiency

Введение

Актуальность рассматриваемых в статье вопросов определяется возросшим значением энергоэффективности и оптимизации систем теплоснабжения (СТ) для подачи и распределения рабочей среды (теплоносителя), требующие развития действующих и создания новых высокоэффективных систем для промышленных предприятий и коммунального хозяйства, которым в современных условиях отечественные хозяйствующие субъекты и общество в целом отводят первостепенную роль. В связи с ростом цен на топливо и, как следствие, увеличением издержек при работе источника тепла – тепловых станций (ТС), в т.ч. котельных, связанных с оплатой топлива, вопрос эффективного и рационального использования энергетических ресурсов на ТС становится сверх актуальным. К тому же, повышение энергоэффективности ТС является перспективным направлением снижения энергопотребления. Для снижения энергоемкости большое значение придается оптимизации системы теплоснабжения и ТС в целом, т.к. тепловые станции, как один из основных структурных элементов СТ, во многом определяют ее эксплуатационные и экономические показатели работы.

В работах [1–13] представлены решения многообразных задач, связанных с совершенствованием работы как котлов и котельного оборудования ТС [1–12], так и их тепловых схем для производства и транспорта тепла [13,15]. Вследствие изменения объемов производства тепла по мере суточного потребления, агрегаты (источники тепла) тепловой станции (ТС) и система теплоснабжения (тепловые сети и др.) часто эксплуатируются в неоптимальных режимах с пониженным КПД, что может приводить к существенному перерасходу топлива.

Проведенный анализ существующей практики совершенствования системы теплоснабжения в целом позволил выявить ее некоторые недостатки:

- в существующих инженерных инструментальных элементах системы теплоснабжения (котельная, тепловая схема, тепловая сеть, потребитель) рассматриваются в основном по отдельности, без учета взаимного влияния ТС и тепловых потребителей, обусловленного наличием технологических связей.

- недостаточная информированность существующих математических моделей относительно каждого агрегата (источника тепла) и оптимального соотношения их состава в случае регулирования переменной нагрузки, в т.ч. пиковой.

Кроме того, по существующим оценкам, до 10÷15% энергозатрат систем теплоснабжения могут быть снижены за счет изменения только состава оборудования ТС и способов управления ими. Одним из эффективных путей экономии энергоресурсов при существующих переменных нагрузках является оптимизация состава и режимов работы оборудования. Она может производиться по следующим направлениям:

- выбор оптимального числа эксплуатируемых агрегатов в любой момент времени;
- оптимального распределения нагрузки между ними;
- оптимизация работы установок с использованием циклического (ступенчатого) их подключения при работе на тепловую сеть [1,11] и др.
- рациональное построение системы теплоснабжения для покрытия переменных нагрузок ТС.

Система производства и распределения тепла (с комплексом энергетического оборудования) должна производить столько продукции (тепла) [12], сколько требуют в данный момент потребители, определяющие нагрузку ТС – вырабатываемое в данный момент времени количество тепла. Этим определяются и характер работы источников тепла на отопление, горячее водоснабжение и др. этих систем, и их графики нагрузок - изменение нагрузки во времени. Обычно это изменение или изменение потребляемого топлива во времени представляется графически в зависимости от отрезка времени. Различают суточные, недельные, сезонные (лето, зима) и годовые графики. Они служат для выбора состава оборудования при проектировании тепловых станций, определения текущих и годовых технико-экономических показателей, распределения различных тепловых нагрузок и установления оптимальных режимов работы оборудования. Графики нагрузок, а значит, и графики потребления тепла, и в конечном счете – топлива, отличаются значительной неравномерностью. Объясняется она неодинаковым режимом потребления рабочей среды (продукции ТС) разными группами тепловых потребителей на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение коммунальными хозяйствами, промышленными потребителями и др. Суммарная нагрузка Q непрерывно изменяется, достигая в определенные моменты наибольшей (Q_{max}) и наименьшей (Q_{min}) величины. На этом основании его разбивают на три зоны [12]: пиковая, полупиковая и базовая. В этих условиях вопросы регулирования тепловой нагрузкой, и экономичность ТС имеют большое значение.

Не перечисляя известные методы регулирования тепловой нагрузки, обратим внимание на способ периодического отключения или перевода источника тепла на режим холостого хода, на так называемое цикличное (импульсное) регулирование. Для котлов с цикличным регулированием подачи тепла в систему теплоснабжения при периодическом их отключении такая теория разработана в [1], где проведен теоретический анализ динамики такого импульсного регулирования. В этом случае источники тепла должны оснащаться системой регулирования, обеспечивающей изменение теплопроизводительности путем автоматического перевода их на холостой ход путем снижения до минимума расхода топлива на горелочные устройства. Последние работают в течение контролируемого промежутка времени в режиме «большого» горения и затем циклически переключаются в режим «малого» горения или полностью выключаются. Наглядные практические доказательства преимущества его эффективности при использовании импульсного нагрева теплоносителя в системах теплоснабжения (СТ) зданий, особенно при покрытии переменных нагрузок ТС, в технической литературе, практически отсутствуют.

Цель работы

На основе разработанной ранее физической модели рабочего процесса [1] и ее анализе для установок ТС с цикличным (импульсным) подводом теплоты к системе теплоснабжения представить практическое обоснование эффективности такого подвода тепла при переменных тепловых нагрузках. Разработать оптимальные варианты при выборе состава оборудования ТС (котельной) для покрытия, как базовой части суточного переменного графика ее нагрузок, так и пиковой, для рационального построения системы производства и транспорта тепла и улучшение работы ТС и СТ, в т.ч. для перспективных проектов.

Изложение основного материала

В соответствии с представленной теорией [1] импульсного нагрева рабочей среды в системах теплоснабжения, ниже представлена разработанная на ее основе методика расчета, которая по определенному алгоритму определяет регулировочные характеристики системы теплоснабжения для покрытия годового графика нагрузок на различных возможных ее вариантах работы. В этой методике необходимо определить для каждого режима потребления теплоты продолжительность цикла, фаз нагрева и остывания теплоносителя во время холостого хода или останова генератора теплоты, величину скважности и др.

Так в исследовании [1], при полном отключении оборудования во время паузы, длительность нагрева теплоносителя (импульс

нагрева) – отрезок времени, в течение которого котел (и его горелки) работают при максимальном расходе топлива, можно определить, используя соотношение [1]:

$$\tau_{имп} = \frac{mc}{kF} \cdot \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \frac{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta_{нач}}{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta} \quad (1)$$

Длительность простоя (пауза) – отрезок времени между двумя последовательными импульсами, в течение которого топливо на горелку котла не подается, и происходит охлаждение теплоносителя вследствие потерь тепла в окружающую среду, определяется как

$$\tau_{паузы} = \frac{mc}{kF} \cdot \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \frac{\vartheta_{нач} - \vartheta_0}{\vartheta - \vartheta_0} \quad (2)$$

Тогда период включения $\tau_{ц}$ – отрезок времени между началами двух последовательных импульсов, определяется суммой соотношений (6) и (7), а их скважность S равна отношению периода $\tau_{ц}$ следования импульсов к длительности импульса $\tau_{имп}$

$$S = \frac{\tau_{ц}}{\tau_{имп}} = 1 + \frac{\ln \frac{\vartheta_{нач.паузы} - \vartheta_0}{\vartheta_{кон.паузы} - \vartheta_0}}{\ln \frac{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta_{нач.имп}}{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta_{кон.имп}}} \quad (3)$$

При этом, $\vartheta_{кон.имп} = \vartheta_{нач.паузы}$, $\vartheta_{нач.имп} = \vartheta_{кон.паузы}$.

Из соотношения для определения периода включения $\tau_{ц}$ можно определить величину частоты подвода тепла (импульсов), c^{-1}

$$\omega = \frac{1}{\tau_{ц}} = \kappa \frac{kF}{mc} \left[\ln \frac{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta_{нач.имп}}{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta_{кон.имп}} \cdot \frac{\vartheta_{нач.паузы} - \vartheta_0}{\vartheta_{кон.паузы} - \vartheta_0} \right]^{-1} \quad (4)$$

Осредненная величина затраченной тепловой мощности P_{cp} за цикл, определяется, согласно [1], по формуле:

$$P_{cp} = Q_{ц} = \frac{P_{max}}{S} = P_{max} \cdot \beta \quad (5)$$

где $\beta = S^{-1}$ – обратная величина скважности импульсов или коэффициент заполнения цикла (коэффициент использования мощности источника тепла) – отношение длительности импульса к периоду включения.

В соотношениях (1) – (5) P – подводимая тепловая мощность; c , ϑ и m – теплоемкость, текущая температура и масса нагреваемого теплоносителя; k – коэффициент теплопередачи; F – суммарная поверхность теплопередачи (поверхность ограждения зданий); ϑ_0 – температура окружающей среды (в помещении или за ее пределами); κ –

коэффициент пропорциональности температуры воздуха внутри помещения температуре теплоносителя, зависящий от параметров теплообмена между теплоносителем и атмосферой внутреннего помещения, а также между внутренним помещением жилого строения и окружающей средой.

Для доказательства эффективности практического применения режима импульсного нагрева рабочей среды при покрытии переменного графика нагрузок в качестве конкретного примера рассмотрена система теплоснабжения одного из районов г. Мариуполя (Украина).

Годовой график нагрузки системы теплоснабжения приведен на рис. 1. При этом график нагрузки сведен к линейно-ступенчатому, где число годовых часов разделены на 12 равных интервалов (месяцев) согласно методике [12]. Величина нагрузки (сплошная полужирная линия) на каждом интервале указаны в поле рисунка в МВт. Здесь же поинтервально нанесена по вертикали равномерная разбивка (светлые линии) по мощности в 1 МВт.

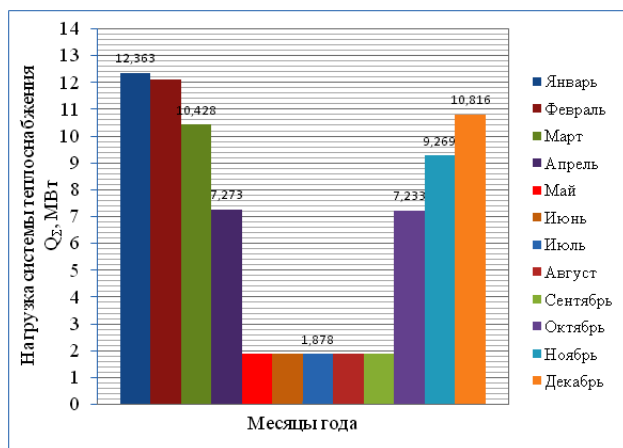


Рис. 1 – Годовой график теплового потребления жилого района по месяцам

При расчете и построении графиков нагрузки, согласно методике [12], системы теплоснабжения (рис. 1) расчётная температура наружного воздуха для систем отопления принята равной $t_o = -23^{\circ}\text{C}$ (условие района г. Мариуполя). Численность населения района $m = 5770$ чел. Общая площадь жилого здания на одного жителя $f_{\text{общ}} = 13,56 \text{ м}^2/\text{чел.}$ [12]. Средняя за отопительный период норма расхода горячей воды на одного жителя в сутки $a = 115 \text{ л/сутки}$. Расчётные нагрузки на отопление жилых и общественных зданий района определяли по [12] как:

$$Q_{o \max} = q_o \cdot A(1+K_1), \quad (6)$$

где q_o – величина удельного показателя теплового потока на отопление жилых зданий, принята равной $158,05 \text{ Вт/м}^2$ при $t_o = -23^{\circ}\text{C}$; A – общая площадь жилых зданий рассматриваемого района ($A = f_{\text{общ}} m$); $K_1=0,25$ – коэффициент, учитывающий наличие общественных зданий.

Максимальный тепловой поток на вентиляцию общественных зданий района:

$$Q_{v \max} = q_o \cdot A \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (7)$$

где $K_2=0,4$ – доля вентиляционной нагрузки.

Среднечасовой тепловой поток на горячее водоснабжение жилых и общественных зданий:

$$Q_{гв} = q_{гв} \cdot m. \quad (8)$$

Укрупнённый показатель теплового потока на горячее водоснабжение $q_{гв}$ с учётом общественных зданий при норме на одного жителя $a = 115 \text{ л/сутки}$ составляет при этом 407 Вт .

При принятых внешних и внутренних параметрах системы теплоснабжения расчётные нагрузки составили: на отопление – $Q_{o \max} = 15,457 \text{ МВт}$, вентиляцию – $Q_{v \max} = 1,236 \text{ МВт}$, на горячее водоснабжение – $Q_{гв} = 2,348 \text{ МВт}$. Суммарная максимальная нагрузка ($Q_{\Sigma} = 19,041 \text{ МВт}$) по району определена суммированием расчётных тепловых потоков на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение:

$$Q_{\Sigma} = Q_{o \max} + Q_{v \max} + Q_{гв}. \quad (9)$$

В соответствии с последней для покрытия расчетной (максимальной зимней) нагрузки выбран разный состав источника тепла (котельной) системы теплоснабжения (без учета резервного котла):

- 1) ТВГ-4 (4,65 МВт) – 5 котлов.
- 2) КВГМ-10 (11,6 МВт) – 2 котла.
- 3) КВ-Р-23,26-150 (23,26 МВт) – 1 котёл.
- 4) Двухходовый котёл ELLPREX 5000 (5 МВт) – 4 котла.
- 5) Двухходовый котёл ELLPREX 7000 (7 МВт) – 3 котла.

Первые три варианта котельной имеют одинаковую суммарную тепловую мощность.

Для построения годового графика теплового потребления по месяцам (рис.1) были использованы среднемесячные температуры наружного воздуха г. Мариуполя [14]. Часовые расходы теплоты на отопление и вентиляцию для каждого месяца со среднемесячной температурой ниже $+8^{\circ}\text{C}$ составили:

$$Q_{o \text{ ср}} = Q_{o \max} \frac{t_{op} - t_{ср.мес}}{t_{op} - t_o}, \quad (10)$$

$$Q_{в \text{ ср}} = Q_{в \max} \frac{t_{op} - t_{ср.мес}}{t_{op} - t_o}, \quad (11)$$

где t_{op} и t_o – расчётные температуры воздуха внутри помещений и в окружающей среде.

Среднечасовой расход теплоты на горячее водоснабжение $Q_{гв}^n$ для неотапительного периода

$$Q_{гв}^n = \beta Q_{гв} \frac{55 - t_x^n}{55 - t_x}, \quad (12)$$

где t_x , t_x^n – расчётные температуры холодной воды соответственно в зимний и летний период.

Суммарные месячные расходы теплоты в отопительный период

$$Q_{\Sigma}^{cp} = Q_{o\,cp} + Q_{в\,cp} + Q_{гв}^l \quad (13)$$

Для неотапливаемого периода суммарный расход теплоты равен среднечасовому расходу теплоты на горячее водоснабжение ($Q_{гв}^l = 1,878$ МВт). Результаты расчётов по (6) – (13) сведены в табл. 1, на основании которых и построен годовой график теплового потребления по месяцам (рис. 1).

Таблица 1 – Среднечасовые расходы теплоты по месяцам года

Расход теплоты, МВт	Среднемесячная температура наружного воздуха, $t_{ср.мес}$ °C					
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
	-6,6	-6	-1,8	5,9	11,9	16,1
Q_o	9,274	9,048	7,464	4,561	-	-
$Q_{в}$	0,741	0,723	0,596	0,364	-	-
$Q_{гв}$	2,348	2,348	2,348	2,348	1,878	1,878
Q_{Σ}	12,363	12,119	10,428	7,273	1,878	1,878

Расход теплоты, МВт	Среднемесячная температура наружного воздуха, $t_{ср.мес}$ °C					
	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
	18,2	17,3	12,2	6	1	-2,8
Q_o	-	-	-	4,524	6,409	7,841
$Q_{в}$	-	-	-	0,361	0,512	0,627
$Q_{гв}$	1,878	1,878	1,878	2,348	2,348	2,348
Q_{Σ}	1,878	1,878	1,878	7,233	9,269	10,82

Обсуждение результатов

Для демонстрации преимуществ импульсного нагрева теплоносителя для выбранных вариаций составов котлов на котельной и для простоты и наглядности представляемых результатов соотношения (6) – (8) приведены к линейному виду разложением в ряд логарифмические функции в этих выражениях и ограничиваясь одним его членом. При этом формула (3) для определения скважности S приобретает вид:

$$S = \frac{\tau_{\text{и}}}{\tau_{\text{имп}}} = \frac{P}{Q_{\text{ном}}^{\text{нач.паузы}}} + \left(1 - \frac{Q_{\text{ном}}^{\text{нач.имп.}}}{Q_{\text{ном}}^{\text{нач.паузы}}}\right) = \frac{1}{q_{\text{ном}}^{\text{нач.паузы}}} + \left(1 - \frac{q_{\text{ном}}^{\text{нач.имп.}}}{q_{\text{ном}}^{\text{нач.паузы}}}\right). \quad (14)$$

Продолжительность импульса и паузы соответственно:

$$\tau_{\text{имп}} = \frac{T}{\kappa} \cdot \frac{\left(1 - \frac{q_{\text{ном}}^{\text{нач.имп.}}}{q_{\text{ном}}^{\text{нач.паузы}}}\right)}{S-1}, \quad \tau_{\text{паузы}} = \frac{T}{\kappa} \cdot \left(1 - \frac{q_{\text{ном}}^{\text{нач.имп.}}}{q_{\text{ном}}^{\text{нач.паузы}}}\right). \quad (15)$$

Длительность цикла и частота:

$$\tau_{\text{ц}} = \frac{T}{\kappa} \cdot \left(1 - \frac{q_{\text{ном}}^{\text{нач.имп.}}}{q_{\text{ном}}^{\text{нач.паузы}}}\right) \frac{S}{S-1}, \quad \omega_{\text{цикла}} = \frac{1}{\tau_{\text{ц}}}. \quad (16)$$

Здесь $q_{\text{ном}}^{\text{кон.паузы}} = q_{\text{ном}}^{\text{нач.имп.}}$, где $q_{\text{ном}} = \frac{Q_{\text{ном}}^{\text{нач.паузы}}}{P}$

- относительный параметр потребления тепла в начале паузы.

Тепло $Q_{\text{ц}}$, отданное в цикле потребителям, определяется по формуле:

$$Q_{\text{ц}} = \frac{P}{S} = P \cdot \beta = Q_{\text{ном}}^{\text{нач.паузы}} \left[1 - \beta \cdot \left(1 - \frac{q_{\text{ном}}^{\text{нач.имп.}}}{q_{\text{ном}}^{\text{нач.паузы}}}\right)\right]. \quad (17)$$

Из (14) вытекает важное следствие:

$$\frac{1}{P_{\text{ср}}} = \frac{1}{Q_{\text{ц}}} = \frac{S}{P} = \frac{1}{Q_{\text{ном}}^{\text{нач.паузы}}} + \frac{1}{P} \left(1 - \frac{Q_{\text{ном}}^{\text{нач.имп.}}}{Q_{\text{ном}}^{\text{нач.паузы}}}\right). \quad (18)$$

Как видно из соотношения (18), с ростом мощности подвода тепла P к системе теплоснабжения увеличивается затраченная тепловая мощность за цикл $Q_{\text{цикл}} = P_{\text{ср}}$ при всех остальных неизменных параметрах.

При решении поставленной задачи были приняты следующие основные допущения:

1. КПД котла при изменении нагрузки потребления и длительности его эксплуатации не изменяется, и им пренебрегаем.

2. Котлы должны быть оснащены системой регулирования, обеспечивающей изменение производительности котла от 0 до 100%, при использовании ступенчатого (циклического) регулирования, путем автоматического перевода его на пониженные нагрузки, или выведены из работы.

Расчёты по представленному алгоритму проведены для полученного выше разного состава оборудования источника тепла (котельной) с различными характеристиками системы теплоснабжения, параметры системы изменялись в

диапазоне $\frac{T}{\kappa} = \frac{mc}{\kappa \cdot kF} = 5 \div 20$ с диапазоном ее

настройки $\bar{q} = \frac{q_{\text{ном}}^{\text{нач.имп.}}}{q_{\text{ном}}^{\text{нач.паузы}}} = 0,9$. Некоторые данные

результатов приведены в табл. 2, 3 и на рис. 2.

В табл. 2 и 3 представлены данные из расчета регулировочных характеристик системы теплоснабжения, на основании упрощенных соотношений (14) – (17), полученные при работе в импульсном режиме соответственно 5-ти котлов с суммарной мощностью (23,25 МВт), и от 1 до 3 котлов ТВГ-4 с единичной тепловой мощностью 4,65 МВт. Работа последних осуществлялась в соответствии с графиком годовой нагрузки СТ (табл.1), а количество работающих котлов z при покрытии соответствующей нагрузки изменялось. Здесь же представлены сравнительные данные производства и/или

потребления тепловой энергии при циклической работе 5, и от 1 до 3 котлов ТВГ-4 с полным их отключением.

Таблица 2 – Регулировочные характеристики системы теплоснабжения при работе 5 котлов с суммарной мощностью (23,25МВт)

Расчетный параметр	Номер периода (месяц года)							
	1	2	3	4	5-9	10	11	12
Q_{Σ} , МВт	12,3	12,1	10,4	7,2	1,88	7,2	9,2	10,8
$q_{\text{ном}} = Q_{\text{ном}}/P_{\text{макс}}$	0,53	0,52	0,45	0,31	0,08	0,31	0,40	0,46
$\tau_{\text{имп}}$, сек	2,02	1,96	1,52	0,86	0,17	0,86	1,25	1,57
$\tau_{\text{паузы}}$, сек	2	2	2	2	2	2	2	2
$\tau_{\text{ц}}$, сек	4,02	3,96	3,52	2,86	2,17	2,86	3,25	3,57
Частота ω , с ⁻¹	0,25	0,25	0,28	0,35	0,46	0,35	0,31	0,28
S	1,99	2,02	2,32	3,33	12,6	3,33	2,6	2,27
$Q_{\text{ц}}$, МВт	11,68	11,51	10,02	6,98	1,85	6,98	8,94	10,24
Δt , час	720	720	720	720	720	720	720	720
N_i , ГДж·10 ⁻³	30,27	29,83	25,97	18,09	4,8	18,09	23,17	26,54
$N_{\text{трад}}$, ГДж·10 ⁻³	31,9	31,4	27,0	18,7	4,873	18,7	23,8	28,0
Экономия тепла	$\frac{\sum_{i=1}^{12} N_{i \text{ трад}} - \sum_{i=1}^{12} N_i}{\sum_{i=1}^{12} N_{i \text{ трад}}} \cdot 100\% = 3,88\%$							

Таблица 3 – Регулировочные характеристики системы теплоснабжения при работе от $z=1$ до 3 котлов

Расчетный параметр	Номер периода (месяц года)							
	1	2	3	4	5-9	10	11	12
z	3	3	3	2	1	2	2	3
Q_{Σ} , МВт	12,3	12,1	10,4	7,2	1,88	7,2	9,2	10,8
$q_{\text{ном}} = Q_{\text{ном}}/P_{\text{макс}}$	0,88	0,87	0,75	0,77	0,39	0,77	0,99	0,75
$\tau_{\text{имп}}$, сек	8,33	8	4,65	5,0	1,2	5,0	18,18	4,65
$\tau_{\text{паузы}}$, сек	2	2	2	2	2	2	2	2
$\tau_{\text{ц}}$, сек	10,33	10	6,65	7,0	3,2	7,0	20,18	6,65
Частота ω , с ⁻¹	0,1	0,1	0,15	0,14	0,31	0,14	0,05	0,15
S	1,24	1,25	1,43	1,4	2,66	1,4	1,11	1,43
$Q_{\text{ц}}$, МВт	11,25	11,16	9,76	6,64	1,75	6,64	8,38	9,76
Δt , час	720	720	720	720	720	720	720	720
N_i , ГДж·10 ⁻³	29,08	28,93	25,3	17,21	4,54	17,2	21,72	25,3
$N_{\text{трад}}$, ГДж·10 ⁻³	31,9	31,4	27,0	18,7	4,873	18,7	23,8	28,0
Экономия тепла	$\frac{\sum_{i=1}^{12} N_{i \text{ трад}} - \sum_{i=1}^{12} N_i}{\sum_{i=1}^{12} N_{i \text{ трад}}} \cdot 100\% = 8,06\%$							

Сравнительный график производства и/или потребления для этих же режимов (табл. 2, 3) и дополнительно для режимов работы с 4 котлами ТВГ (1 в резерве), 3 (2 в резерве) представлены на рис. 2.

Из полученных результатов видно, что более выгодны режимы всех вариантов с импульсной подачей и полным отключением котлов.

Наименьшая величина потребления ($187,44 \cdot 10^3$ ГДж) в сравнении с остальными вариантами была затрачена при работе от 1 до 3 котлов, при этом уменьшается частота циклов, что полностью соответствует результатам [1]. Для сравнения, работа ТС по традиционному способу нагрева теплоносителя приводит к суммарной потребляемой тепловой энергии $203,87 \cdot 10^3$ ГДж. При этом снижение производства и потребления тепловой энергии, по сравнению с традиционным способом подвода тепла, составляет до $7 \div 10\%$ (в среднем около 8%), что существенно.

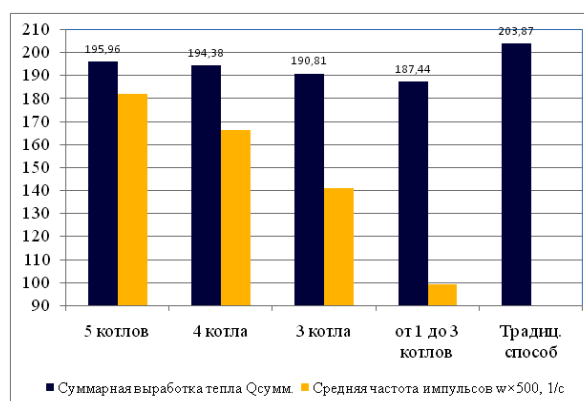


Рис. 2 – Сравнительный анализ годового производства (или потребления) тепловой энергии при работе 1-3, 3, 4 и 5 котлов на импульсном режиме с полным их отключением

Таким образом, покрытие годового графика нагрузок СТ более выгодно осуществлять с использованием импульсного режима. Отрицательным моментом такого регулирования может быть лимитирование этого процесса числом «останова – пуска» в связи с возникновением усталостных напряжений в оборудовании источника тепла в этом случае. Этот момент, возможно, может быть обойден подбором параметрических характеристик импульсного регулирования.

В заключении можно отметить, что полученные результаты с успехом могут использоваться техническими работниками при выборе оптимальной эксплуатационной схемы работы источников тепла (котлов) для покрытия графиков нагрузок в короткие сроки без использования сложных вычислительных программных комплексов. Такой подход позволяет минимизировать средний удельный расход тепловой энергии и др. Кроме того, эту методику можно использовать для оптимизации работы ТС при покрытии ею тепловой нагрузки в любой момент времени, в т.ч. суточных, сезонных и др.

Выводы

Представлено практическое обоснование эффективности применения импульсного подвода тепла при переменных тепловых нагрузках. Разработаны оптимальные варианты при выборе состава оборудования ТС (котельной) для покрытия, как базовой части суточного переменного графика ее нагрузок, так и пиковой, для рационального построения системы производства и транспорта тепла и улучшения работы ТС.

Список литературы

1. Лухтура Ф. И., Цыганов В. И. О применении импульсного подвода тепла в системах теплоснабжения. *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2018. № 45(1321). С.32–40. doi:10.20998/2413-4295.2018.
2. Кнорре Г.Ф. [и др.]. *Теория топочных процессов.* М.-Л.: Энергия, 1966. 491 с.
3. Кацнельсон Б. Д., Тарakanовский А. А. Сжигание топлива в пульсирующем потоке. *Теория и практика пульсационного горения:* Тр. ЦКТИ. Л.: 1965. Вып. 64. С. 3–7.
4. Pachaiyappan R., Dasa Prakash J. Improving the boiler efficiency by optimizing the combustion air. *Applied Mechanics and Materials.* 2015. V. 787. P. 238–242. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.787.238.
5. Mallikarjuna V., Jashuva N., Rama Bhupal Reddy B. Improving boiler efficiency by using air preheater. *International journal of advanced research in engineering and applied sciences.* 2014. V. 3. № 2. P. 11-24.
6. Ghritlahre H., Pratap Singh T. Effect of Excess Air on 30 TPH AFBC Boilers on dry Flue Gas Losses and its Efficiency. *International Journal of Research in Advent Technology.* 2014. V. 2. № 6. P. 19–23.
7. Abramovskikh A. A., Ulyanova U. A., Lavrinenko S. V., Matveeva A. A., Malishev D. Modernisation of boiler unit automation system at acting power station. *MATEC Web of Conferences* 91, 01002. 2017. doi: 10.1051/mateconf/20179101002
8. Hu L., Lv Y., Tang K., Richards G. An Improved Methodology for Pulse Combustion with Programmable Timing Sequence Used in Reheating Furnaces. *ISIJ International.* 2017. V. 57. № 12. P. 2266–2268. doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-020.
9. Таймаров М. А., Шарипов М. Р. Котёл пульсирующего горения природных и пиролизных газов. *Вестник Казанского технологического университета.* 2013. Т. 16. № 21. С. 133–135.
10. Синицын А. А. Исследование особенностей работы котла, основанного на пульсирующем горении газообразного топлива. *Нефтегазовое дело.* 2006. № 2. С. 1–13.
11. Дегтярь А. Б., Панферов В. И. Построение алгоритма импульсного отопления зданий и исследование режимов его работы. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника.* 2008. Вып. 8. № 17(117). С. 41–44.
12. Соколов Е. Я. *Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов.* М.: Изд-во МЭИ, 1999. 472 с.
13. Лухтура Ф. И., Цыганов В. И. О применении циклического режима подключения аккумуляторов

теплоты в системах теплоснабжения. *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* Харьков: НТУ «ХПИ». 2019. № 2. С. 35–42. doi:10.20998/2413-4295.2019.02.05.

14. Климатический график. URL: <https://ru.climate-data.org/европа/украина/донецкая-область/мариуполь-619/> (дата обращения: 03.06.2019).
15. Webb J. Improvising innovation in UK urban district heating: the convergence of social and environmental agendas in Aberdeen. *Energy Policy.* 2015. № 78. P. 265–272. doi:10.1016/j.enpol.2014.12.003.

References (transliterated)

1. Lukhtura F., Tsiganov V. On the use of pulse heat in a heat supply system. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, no. 45 (1321), p. 32–40, doi:10.20998/2413-4295.2018.
2. Knorre G. F., Arefev K. M., Blokh A. G. *Teoriya topochnykh protsessov [The theory of furnace processes].* Moscow-Leningrad, Energia Publ., 1966, 491 p.
3. Katsnel'son B. D., Tarakanovsky A. A. Szhiganiye topliva v pul'siruyushchem potoke [Combustion of fuel in pulsating flow]. *Teoriya i praktika pul'satsionnogo gorennya: Tr. TSKTI [Theory and practice of pulsating combustion: Works of CKTI],* 1965, Iss. 64, p. 3–7.
4. Pachaiyappan R., Dasa Prakash J. Improving the boiler efficiency by optimizing the combustion air. *Applied Mechanics and Materials,* 2015, V. 787, p. 238–242, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.787.238.
5. Mallikarjuna V., Jashuva N., Rama Bhupal Reddy B. Improving boiler efficiency by using air preheater. *International journal of advanced research in engineering and applied sciences,* 2014, V. 3, no 2, p. 11-24.
6. Ghritlahre H., Pratap Singh T. Effect of Excess Air on 30 TPH AFBC Boilers on dry Flue Gas Losses and its Efficiency. *International Journal of Research in Advent Technology,* 2014, V. 2, no. 6, p. 19-23.
7. Abramovskikh A. A., Ulyanova U. A., Lavrinenko S. V., Matveeva A. A., Malishev D. Modernisation of boiler unit automation system at acting power station. *MATEC Web of Conferences* 91, 01002, 2017, doi: 10.1051/mateconf/20179101002.
8. Hu L., Lv Y., Tang K., Richards G. An Improved Methodology for Pulse Combustion with Programmable Timing Sequence Used in Reheating Furnaces. *ISIJ International,* 2017, V. 57, no. 12, p. 2266-2268, doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-020.
9. Taymarov M. A., Sharipov M. R. Kotol pul'siruyushchego gorennya prirodnykh i piroliznykh gazov [Boiler of pulsating combustion of natural and pyrolysis gases]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University],* 2013, V. 16, no. 21, p. 133–135.
10. Sinitsyn A. A. Issledovaniye osobennostey raboty kotla, osnovannogo na pul'siruyushchem gorenii gazoobraznogo topliva [Investigation of the peculiarities of the operation of the boiler based on the pulsating combustion of gaseous fuels]. *Neftegazovoye delo [Oil and Gas Business],* 2006, no 2, p. 1–13.
11. Degtyar' A. B., Panferov V. I. Postroyeniye algoritma impul'snogo otopleniya zdaniy i issledovaniye rezhimov yego raboty [Construction of an algorithm for pulsed heating of buildings and study of its operating modes]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya*

- «Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika» [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics], 2008, V. 8, no. 17(117), p. 41–44.
12. Sokolov Ye. Ya. *Teplofikatsiya i teplovyye seti: uchebnik dlya vuzov* [Heating and heating networks: a textbook for universities]. Moscow, Publishing house of the Moscow Power Engineering Institute Publ., 1999. 472 p.
13. Lukhtura F., Tsiganov V. On application of the cycle mode of connecting heat batteries in heat supply systems. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, no. 2, p. 35–42, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.05.
14. Climate graph. Available at: <https://ru.climate-data.org/европа/украина/донецкая-область/мариуполь-619/> (accessed 03.06.2020)
15. Webb J. Improvising innovation in UK urban district heating: the convergence of social and environmental agendas in Aberdeen, *Energy Policy*, 2015, no 78, p. 265–272, doi:10.1016/j.enpol.2014.12.003.

Сведения об авторах (About authors)

Лухтура Федор Иванович – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ст. преподаватель кафедры промышленных теплоэнергетических установок и теплоснабжения; г. Мариуполь, Украина; e-mail: lukhelena@yandex.ru

Fedor Lukhtura – Senior Lecturer, Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, State higher educational establishment “Priazovskyi State Technical University”, Mariupol, Ukraine; e-mail: lukhelena@yandex.ru

Цыганов Владимир Иванович – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ст. преподаватель кафедры промышленных теплоэнергетических установок и теплоснабжения; г. Мариуполь, Украина.

Vladimir Tsiganov – Senior Lecturer, Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, State higher educational establishment “Priazovskyi State Technical University”, Mariupol, Ukraine.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Лухтура Ф. И., Цыганов В. И. Преимущества импульсного подвода тепла для покрытия переменных нагрузок в системах теплоснабжения. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 30-3 . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.04.

Please cite this article as:

Lukhtura F., Tsiganov V. Advantage of pulse heat supply for covering variable loads in heat supply systems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 30-3 . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.04.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лухтура Ф. І., Циганов В. І. Переваги імпульсного підведення тепла для покриття змінних навантажень в системах теплопостачання. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 30-3 . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.04.

АНОТАЦІЯ Розглянуто практичне використання отриманих раніше теоретичних результатів із застосування імпульсного (циклічного) підведення теплоти від джерела тепла (котла), що працює на теплову мережу, для покриття суттєво змінних навантажень системи теплопостачання. Проведено аналіз ефективності роботи системи теплопостачання з різними блоками котельних установок і параметрами систем теплопостачання при змінних навантаженнях на основі аналізу розробленої математичної динамічної моделі системи виробництва і розподілу теплоти. Отримана інженерна теорія послужила також основою для розробки алгоритмів оптимізації системи при ступінчастому регулюванні підведення теплоти джерелами тепла шляхом їх переведення на холостий хід, в т.ч. глибоким зниженням навантаження, або з повним їх вимиканням, на змінних режимах роботи котельні при покритті нерівномірних графіків її навантажень. При цьому оцінені витрати споживаної теплової енергії з метою підвищення економічної ефективності та вибору певного складу обладнання котельні в запропонованих режимах. Визначено, в залежності від ємності теплової мережі та/або акумулюючих теплоту пристроїв, величини споживання теплоти і режимів регулювання, раціональні компоновки котельного обладнання з мінімізацією споживання енергоресурсів. Оцінені ефективні значення тривалості імпульсів подачі теплоти агрегатами котельні і паузи між імпульсами, а також скvapності імпульсів, при використанні різних блоків котельного обладнання. При цьому важливою характеристикою надійності системи теплопостачання є частота циклів, що лімітують кількість регламентованих включень котлів відповідної потужності в зв'язку з наявністю втомних напружень в них. Показано суттєвий вплив перерахованих факторів і зазначених функціональних параметрів на характеристики імпульсного підключення джерел тепла і інтенсивність подачі енергоносія при змінних навантаженнях. Характерно, що при порівнянні різних режимів імпульсної подачі (з холостим ходом і без) кращим режимом є режим з повним відключенням джерел теплоти від теплової мережі. При цьому ефективність зростає з ростом числа експлуатованих агрегатів і досягає близько 10% в порівнянні з традиційним способом підведення теплоти для покриття змінних навантажень теплових мереж. Отримані результати також можуть бути корисні для вирішення оптимізаційних завдань при роботі індивідуальної котельні на змінних режимах при покритті її різних, в т.ч. річних, графіків навантажень. Даний підхід і представлені рішення можуть бути поширені на будь-які інші джерела теплоти, що використовують у якості робочого середовища, як рідину, так і газ (пар), для покриття нерівномірних відповідних теплових навантажень.

Ключові слова: графіки навантажень; джерело тепла (котел); робоче середовище; енергія; акумулятор; імпульсне (циклічне, ступінчасте) регулювання; ефективність

Поступила (received) 06.05.2020